

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА

Г.Ф. Громыко<sup>1)</sup>, А.Ф. Ильющенко<sup>2)</sup>, Н.П. Мацука<sup>1)</sup>, А.И. Шевцов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт математики НАН Беларуси,

ул. Сурганова, 11, Минск, 220072, Беларусь, [grom@im.bas-net.by](mailto:grom@im.bas-net.by), [matsuka@im.bas-net.by](mailto:matsuka@im.bas-net.by)

<sup>2)</sup>Институт порошковой металлургии НАН Беларуси,

ул. Платонова, 41, Минск, 220005, Беларусь, [alexil@mail.belpak.by](mailto:alexil@mail.belpak.by)

Разработана математическая модель тепловых процессов в обмазке, содержащей СВС-реагенты, с инициированием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) под воздействием импульсов плазмы. Исследованы режимы обработки, позволяющие сформировать композиционное износостойкое покрытие на основе карбида титана. В частности, показано, что характер СВС существенно зависит от предварительного подогрева подложки.

## Введение

Использование защитных покрытий, увеличивающих эксплуатационный срок службы деталей, имеет широкое применение.

Разработке и исследованию технологий нанесения упрочняющих покрытий посвящено большое количество работ, например [1-3]. Одним из эффективных способов получения износостойких покрытий является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [4].

СВС относится к разновидностям процессов горения, имеет тепловую природу, в основу которой положена направленная реакция экзотермического взаимодействия двух или нескольких химических элементов (СВС - реагентов). В результате реакции из смеси СВС - реагентов, равномерно распределенных в матрице из инертного связующего металла, в покрытии образуются твердые включения, например карбида титана.

В моделях микрогетерогенного горения выделены две стадии [5]: быстрое горение локального объема (элементарной реакционной ячейки) и предварительного прогрева следующей ячейки – стадия задержки зажигания. Таким образом, горение одной области инициирует другую, т.е. механизм горения является эстафетным.

Целью работы является построение и исследование математической модели тепловых процессов с СВС при формировании композиционного покрытия из обмазки, содержащей порошковую смесь СВС – реагентов (титан и углерод в стехиометрическом соотношении) и инертный наполнитель в виде порошка нихрома, с учетом возможного плавления компонентов. В частности, на основе модели проведен анализ влияния входных параметров на качество формируемого покрытия и определен диапазон температур предварительного подогрева.

Представленные результаты проведены для композиционного покрытия из карбида титана и нихрома (TiC + Ni80Cr20).

## Модель тепловых процессов

В соответствии с технологическим процессом, исследуемую модельную область детали с покрытием  $D$  описываем прямоугольником с размерами 10мм x 10мм (деталь), на верхнюю часть

которого равномерно нанесена и предварительно обработана обмазка толщиной 0,6 мм (покрытие). Со стороны обмазки образец обрабатывается в импульсном режиме высококонцентрированным тепловым потоком плазменной струи, на остальных границах области происходит теплообмен с окружающей средой.

Композиционный состав обмазки опишем сплошной средой, состоящей из нихрома, в которой равномерно распределены частицы - «микрокомпозицы» состава титан и углерод. Выбранная модель укладки «микрокомпозицтов» представлена на рисунке 1.

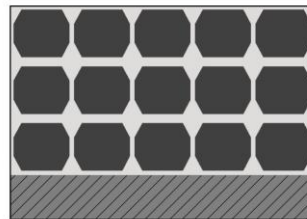


Рис. 1. Геометрическая модель фрагмента обмазки покрытия, содержащего 15 частиц - «микрокомпозицтов», в области границы с подложкой.

Распространение тепла в образце опишем уравнением баланса энергии в декартовой системе координат при предположении изотропности среды:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad t > 0, \quad (1)$$

где  $H$  – удельная энтальпия,  $\rho = \rho(T)$  – плотность,  $T = T(x, z, t)$  – температура в точке  $(x, z)$  в момент времени  $t$ ,  $\lambda = \lambda(T)$  – теплопроводность материала в точке  $(x, z)$ ,  $Q$  – тепловой эффект от реакции для реакционных ячеек  $Q = \tilde{Q} \rho \cdot \partial \eta / \partial t$  [6], для других ячеек  $Q = 0$ .

С учетом плавления компонентов удельная энтальпия имеет вид:

$$H = H(T) = \begin{cases} H(T_0) + cT, & T < T_m, \\ H(T_m - 0) + L_m + c(T - T_m), & T > T_m, \end{cases}$$

где  $H(T_0)$  – начальная энтальпия,  $c$  – теплоемкость единицы объема,  $T_m$  – температура плавления материала,  $L_m$  – скрытая удельная теплота плавления материала.

В качестве начального условия при  $t = 0$  рассмотрим температуру  $T_0$  или энергию  $H_0$ :

$$T(x, z, 0) = T_0 \text{ или } H(x, z, 0) = H_0. \quad (2)$$

На боковых ( $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ ) и нижней ( $\Gamma_3$ ) границах области рассмотрим граничные условия теплообмена с окружающей средой:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_i} = \alpha_{T,i}(T - T_{i,out}), \quad i = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где  $T_{i,out}$  – температура окружающей среды на соответствующей границе области,  $\alpha_{T,i}$  – коэффициенты теплообмена на границах.

На верхней границе образца ( $\Gamma_4$ ) в течение обработки плазменной струей рассмотрим закон теплообмена в виде граничного условия теплообмена с излучением:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \alpha_{T,4}(T - T_{str}) + \beta \varepsilon (T^4 - T_{str}^4), \quad (4)$$

где  $\beta$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности,  $T_{str} = T_{str}(x)$  – распределение температура плазменной струи в области границы образца. Отметим, что тепловой поток от плазменной струи имеет осесимметричную форму и гауссово распределение температуры от оси плазменной струи [7].

После отключения импульса рассматривали граничное условие:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \alpha_{T,4}(T - T_{4,out}), \quad (4a)$$

где  $T_{4,out}$  – температура окружающей среды после отключения импульса,  $\alpha_{T,4}$  – коэффициент теплообмена с окружающей средой.

Система уравнений (1) с граничными (3) - (4) и начальными (2) условиями представляет математическую модель, описывающую нагрев и горение гетерогенной системы с СВС - реагентами в виде «микрокомпозитов» под воздействием импульса плазменной струи.

Приведенная система уравнений решается относительно температуры и глубины превращения реагента в ячейках с «микрокомпозитом».

### Численное решение

На сеточной области дифференциальную задачу (1) - (4) аппроксимируем с помощью метода конечного объема.

Построим неявную разностную схему вида

$$c_{i,k} \rho_{i,k} \frac{T_{i,k} - \bar{T}_{i,k}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_j} \lambda_{(i+1/2,k+1/2)} \frac{T_{i+1,k} - T_{i,k}}{0.5(\Delta x_{j+1} + \Delta x_j)} - \frac{1}{\Delta x_j} \lambda_{(i,k+1/2)} \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{0.5(\Delta x_j + \Delta x_{j-1})} +$$

$$+ \frac{1}{\Delta z_k} \lambda_{(i+1/2,k+1)} \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{0.5(\Delta z_k + \Delta z_{k+1})} - \frac{1}{\Delta z_k} \lambda_{(i+1/2,k)} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{0.5(\Delta z_k + \Delta z_{k-1})} + Q_{i,k} \omega_{i,k} \in D, \quad (5)$$

где  $T_{i,k}$  – усредненная по объему ячейки температура;  $\bar{T}_{i,k}$  и  $\bar{\eta}_{i,k}$  – соответственно температура и глубина превращения в реакционной ячейке на предыдущем временном слое; величины  $\lambda_{(i,k+1/2)}$  и т.д. – приближенные значения коэффициента теплопроводности на соответствующей грани ячейки;  $c_{i,k}$ ,  $\rho_{i,k}$  – приближенные значения коэффициента удельной теплоемкости и плотности в ячейке;  $Q_{i,k}$  – тепловой эффект реакции для ячеек с СВС - реагентами;  $\Delta x_j$ ,  $\Delta z_k$  – размер ячейки по координатным направлениям,  $\Delta t$  – шаг по времени.

Тепловой эффект  $Q_{i,k}$  определяется для реакционных ячеек как

$$Q_{i,k} = \begin{cases} \rho_{i,k} \bar{Q} \frac{\eta_{i,k} - \bar{\eta}_{i,k}}{\Delta t}, & \text{для } \eta_{i,k} < 1, \\ 0, & \text{для } \eta_{i,k} = 1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\eta$  – глубина превращения реагента в реакционной ячейке, которая определяет скорость химического превращения  $W = d\eta/dt$ . Очевидно, что  $0 \leq \eta \leq 1$ . Начальное условие для  $\eta(x, z, 0) = 0$ .

Для граничных ячеек и сеточных узлов на границе области аппроксимационные неявные схемы строили с учетом основного уравнения на границе области и граничных условий, что обеспечивало второй порядок точности по пространству. Для граничных угловых ячеек, аппроксимация проводилась с учетом соответствующих смежных граничных условий.

Нелинейная система решалась экономичным итерационным методом с использованием смены направлений по итерациям и алгоритмом прогонки по текущему направлению. В качестве нулевого приближения брали значения с предыдущего временного слоя.

### Результаты

Результаты моделирования продемонстрируем на примере двух тепловых режимов: предварительный подогрев образца до 500 К (первый) и до 800 К (второй).

Термические константы веществ для вычислений взяты из справочника [8].

Поскольку размеры «микрокомпозитов» значительно меньше размеров расчетной области, результаты моделирования продемонстрируем на фрагменте области.

Теплофизические свойства используемого в качестве инертного связующего материала никрома приводят к большему аккумулированию тепла в «микрокомпозитах» и более быстрому СВС, что хорошо видно в «зернистом» характере

фронта реагирования и последующем выравнивании температуры (рис. 2).

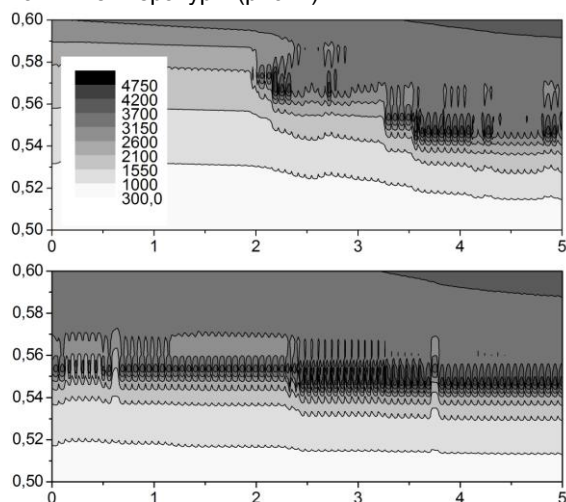


Рис. 2. Температурное поле в половине верхней части покрытия через 13 мкс после начала обработки для первого (верхний график) и второго (нижний) режимов.

Верхний график на рисунке 2 (первый режим обработки) отражает процесс СВС преимущественно в центральной части покрытия, тогда как второй режим демонстрирует СВС по всей ширине покрытия. На этом этапе (во время действия импульса) уже видно качественное отличие протекания СВС.

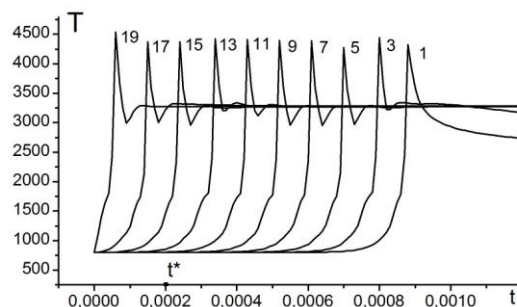


Рис. 3. Динамика температуры в столбце центральных зерен покрытия ( $x=5$  мм).

Дальнейшие расчеты подтвердили, что при первом режиме обработки СВС протекает лишь в части области и затухает после выключения импульса. Тогда как при втором наблюдается эстафетный характер СВС по всему покрытию. На рисунке 3 показана температура зерен централь-

ного столбца «микрокомпозитов», пик температуры соответствует протеканию СВС, номер – ряду укладки покрытия, начиная от подложки,  $t^*$  – время выключения импульса.

Численный анализ результатов показал, что оптимальным подогревом подложки является диапазон температур, близких ко второму режиму.

## Заключение

Одной из сложностей технологических процессов при высокотемпературной плазменной обработке материалов является многообразие входных параметров: предварительный подогрев образца, мощность источника, расстояние до образца, время импульсной обработки и др. Грамотный выбор параметров позволяет получить покрытие высокого качества. Математическое моделирование тепловых процессов с СВС, позволяет получить прогнозный диапазон подходящих входных параметров. В работе показано существенное влияние предварительного нагрева образца на эстафетный характер протекания СВС во всем покрытии, что приводит к формированию упрочняющего покрытия с равномерным распределением зерен карбида титана.

## Список литературы

1. Кудинов В.В., Пекшеев П.Ю., Белащенко В.Е. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 406 с.
2. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий. Минск: Бел. Наука, 2006. 363 с.
3. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий. Минск: Бестпринт, 2007. 246 с.
4. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение. Черноголовка, 2000. 239 с.
5. Гринчук П.С., Рабинович О.С. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 41–53.
6. Талако Т.Л., Рабинович О.С. // Порошковая металлургия. 2013. Т. 36. С. 78–83.
7. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И., Громыко Г.Ф. Моделирование процессов газотермического напыления покрытий. Минск, Бестпринт. 2008. 264 с.
8. Термические константы веществ. Справочник / Под ред. В.П. Глушко. Вып. IV, М.: Изд-во АН СССР, 1970. Вып. V. 1971. Вып. VII. 1974.

## MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES FOR PARAMETERS RESEARCHES AT FORMING A COMPOSITE TITANIUM CARBIDE BASIS COATING

Galina Gromyko<sup>1)</sup>, Alexander Ilyuschenko<sup>2)</sup>, Nadezhda Matsuka<sup>1)</sup>, Alexander Shevtsov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Mathematics, Sarganov str., 11, Minsk, 220072, Belarus, grom@im.bas-net.by, matsuka@im.bas-net.by

<sup>2)</sup>National Academy of Sciences of Belarus, Powder Metallurgy Institute, Platonov str., 41, Minsk, 220005, Belarus, alexil@mail.belpak.by

The mathematical model of thermal processes at influence by a plasma impulse on the plaster containing SHS-reagents with initiation of the self-propagating high temperature synthesis is developed. A series of numerical experiments on studying of behavior of initial charge at various processing of a sample is carried out. It is shown that a character of SHS significantly depends on the heating of a substrate.